



基于支节容性加载的小型化低剖面超表面天线

摘要

本文对容性支节加载的小型化超表面天线进行了分析与设计.通过在方形贴片上引入一对容性负载支节,可以有效地降低超表面单元的工作频率,从而将传统方形贴片超表面单元的尺寸减小55%.在单元设计的基础上,设计了一款4×4阵列的超表面天线,并采用特征模分析(CMA)解释了超表面天线的辐射机制.为了验证设计思路,对天线进行了加工和测试,测量的-10 dB 阻抗带宽为21.7%,并在工作频带内保持6 dBi的辐射增益.

关键词

超表面;小型化天线;容性加载;特征模分析

中图分类号 TN820

文献标志码 A

收稿日期 2018-11-20

资助项目 国家自然科学基金青年基金(61601224);江苏省自然科学基金青年基金(BK20160844)

作者简介

隽月,女,博士生,研究方向为小型化天线和超材料天线.juanyue9008@163.com

1 南京理工大学 电子科学与光电技术学院,南京,210094

2 华南理工大学 电子与信息学院,广州,510640

0 引言

近年来,超表面天线因其高增益和宽带等优点引起了广泛的关注.文献[1]详细比较了超表面天线和贴片天线的性能,与传统的贴片天线相比,超表面天线在增益和带宽方面都具有明显的优势.但是,超表面天线的整体尺寸通常大于传统的贴片天线,这导致了超表面天线在阵列设计和集成上存在一定的困难.因此,在保持高性能的同时设计结构紧凑且低剖面的超表面天线十分必要.

传统超材料天线通常作为反射板^[2-3],但超表面天线则是将超材料结构作为辐射体.文献[4]中将4×4的正方形贴片超材料结构作为辐射单元,并采用缝隙进行馈电.比较发现,提出的新型超表面天线的 $|S_{11}|$ 低于-10 dB的工作带宽为28%,且带内增益都均超过了6 dBi,明显优于传统贴片天线.这是由于超表面天线的面积几乎充满了整个辐射口径,从而提高了天线的增益.但是超表面阵面尺寸为 $0.73\lambda_0 \times 0.73\lambda_0 \times 0.06\lambda_0$,远大于传统贴片天线的 $0.5\lambda_0 \times 0.5\lambda_0$.为了减小阵面的尺寸,文献[1]提出了采用工字形单元结构代替方形贴片单元来减小天线尺寸,2×2阵列的尺寸可以减小为 $0.4\lambda_0 \times 0.37\lambda_0 \times 0.05\lambda_0$,但是天线带宽降低到13%且增益减小到6.1~7.8 dBi.文献[5]提出了采用双层超表面的结构来减小天线尺寸,天线上层为2×2大方形贴片阵列,下层为6×6小方形贴片阵列,通过双层结构阵面尺寸可以减小为 $0.46\lambda_0 \times 0.46\lambda_0 \times 0.06\lambda_0$,天线带宽仍可保持27.4%,增益减小到6.5~7.6 dBi.但是该天线加上馈电结构一共有3层,大大增加了天线的复杂度.

为了解决尺寸过大问题,本文提出了一种新型的通过支节加载的小型化超表面天线.采用单层超表面结构,通过在方形贴片上加载支节,引入寄生电容,使得天线的工作频率可以通过条带插入深度的改变来进行调节.插入越深,工作频率越低,则天线电尺寸越小,最终4×4超表面阵面的尺寸可以减小到 $0.49\lambda_0 \times 0.49\lambda_0 \times 0.044\lambda_0$.天线样品测量的-10 dB 阻抗带宽为21.7%,并且在整个工作频带内可以保持6 dBi的辐射增益.

1 小型化超表面单元理论分析

图1a所示为传统的方形贴片的超表面单元^[4],超表面单元尺寸 $0.183\lambda_0 \times 183\lambda_0 \times 0.047\lambda_0$,该尺寸较大且不利于天线阵列的设计.本文

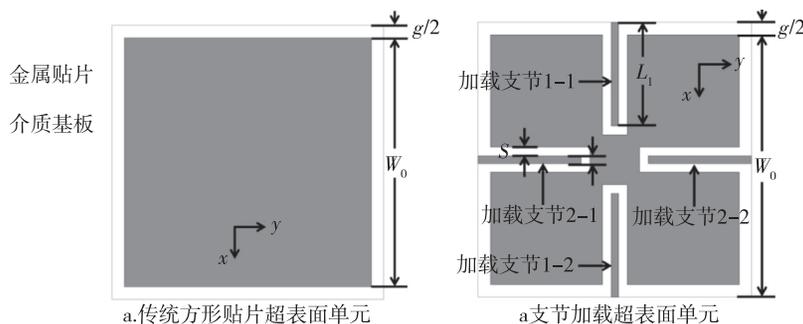
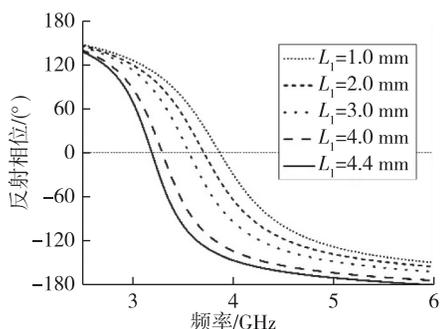


图1 传统方形贴片超表面单元和支节加载的超表面单元结构示意图

 Fig. 1 Geometry of metasurface unit cell: (a) conventional square patch unitcell;
 (b) proposed miniaturized metasurface unit cell with strips

通过引入支节增加等效电容的方法,来降低天线的谐振频率,进而减小超表面单元的电尺寸.在图 1a 所示的超表面单元的基础上,沿着 x, y 方向同时加载金属条带 1 和 2,如图 1b 所示.为了保持单元结构的对称性,支节 1 和 2 的尺寸需保持相同.

作为一个周期结构,通常采用周期边界来对超表面单元进行分析,并通过零反射相位点来表征超表面单元的工作频点^[6-7].图 2 给出了金属条带 1 和 2 的长度 L_1 对超表面单元反射相位的影响.当 L_1 由


 图2 超表面单元反射相位随加载条带长度 L_1 的变化
 Fig. 2 Simulated reflection phase of metasurface when the length of strips L_1 increases from 1 mm to 4.4 mm

1 mm 增长为 4.4 mm 时,超表面单元所对应的零反射相位点的工作频率从 4 GHz 下降至 3.2 GHz.因为引入的等效电容随条带长度的增加而增加,超表面单元的工作频率也随之降低,故此起到减小超表面单元电尺寸的作用.当插入深度达到 4.4 mm,超表面单元的尺寸可以减小为 $0.112\lambda_0 \times 112\lambda_0 \times 0.035\lambda_0$,比经典方形贴片的尺寸减小 62%.研究表明,支节和贴片之间的缝隙 s 和支节宽度 W_1 对于超表面单元的工作频率影响很小,因此主要是通过插入支节的深度来调节天线的工作频率.

2 小型化超表面阵列特征模分析

由上述分析可知,可以通过金属条带的加载,得到尺寸仅为 $0.112\lambda_0 \times 112\lambda_0 \times 0.035\lambda_0$ 的小型化超表面单元,在此单元的基础上,构建了一个 4×4 的超表面阵列作为天线辐射单元,如图 3a 所示.为了进一步分析所提出的超表面阵列,通过特征模分析 (CMA) 的方法对该超表面结构的固有模式进行分析^[8-9].超表面结构固有的模式可以通过仿真软件 CST MWS 中集成的 CMA 工具进行分析,CST 中的

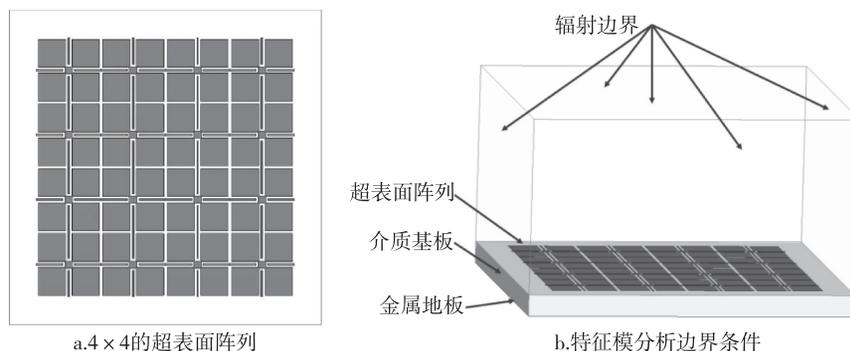


图3 超表面阵列结构示意图及模式分析边界条件

Fig. 3 Geometry of proposed metasurface array and the boundary condition of metasurface array in CST

边界条件如图 3b 所示^[10]。

选取 3.5 GHz 为工作频率,该超表面阵列前 6 种特征模式(模式 1—模式 6)的模式强度如图 4 所示。这 6 种模式虽然工作在不同的频带下,但是具有相似的变化趋势,每个模式在工作频率下对应的表面电流分布和辐射方向图如图 5 和 6 所示。

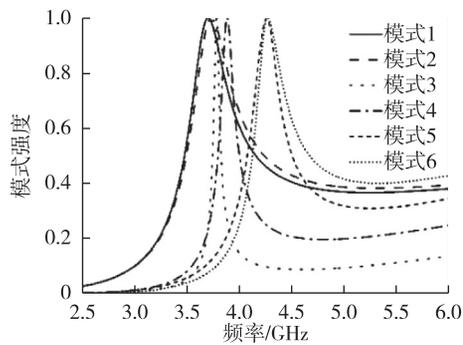


图 4 超表面阵列模式 1—模式 6 的模式强度
Fig. 4 The modal significance of Mode1 to Mode6

如图 5 所示,这 6 种特征模式(模式 1—模式 6)在超表面的电流分布用黑色箭头标出,分别标记为 $J_1 \sim J_6$ 。模式 1 和模式 2 对应的表面电流分布 J_1 和 J_2 在每个单元上的电流都保持方向相同,因此 J_1 和 J_2 的电流分布对应的模式可以激励出沿 z 轴的辐射方向图,如图 6a 和 6b 所示。而如图 5c—5f 所示,模式 3 表面电流分布 J_3 在平面上呈中心对称,模式 4 和 5 的表面电流分布 J_4 和 J_5 在平面上沿对角线轴对称,模式 6 的表面电流分布 J_6 在平面上沿 y 轴对称。由

于 $J_3 \sim J_6$ 在超表面上的电流分布沿中心线呈反向的状态,会产生抵消作用,所以 $J_3 \sim J_6$ 对应模式下的辐射方向图在 z 方向上会出现凹点,如图 6c—6f 所示。因此 J_1 和 J_2 所激励的模式 1 和模式 2 是期望的主工作模式,而 $J_3 \sim J_6$ 所激励的模式 3—模式 6 是需要抑制的高阶模式。

基于上述超表面单元的参数分析,超表面单元的宽度 W_0 和单元之间的间隙 g 决定了天线的初始谐振频率。随着 W_0 的增加或间隙宽度 g 的减小,天线的工作频率降低,轴比带宽增加。通过仿真优化,本节将选取超表面单元的宽度 $W_0 = 10$ mm,间隙 $g = 0.5$ mm。在保持单元宽度 W_0 和单元间隙 g 不变的情况下,支节插入深度 L_1 变化对天线性能的影响也可以通过 CMA 的方法进行分析。图 7 给出了支节插入深度 L_1 对超表面阵列模式 1 和模式 2 模式强度的影响。当 L_1 从 2 mm 增加到 4.4 mm 时,由于引入电容的增加,模式 1 和模式 2 的谐振频率都从 4.71 GHz 下降到 3.7 GHz,频率的降低也就意味着表面阵列尺寸的减小。但模式 1 和模式 2 的带宽均随着频率的降低而变窄。此外,也对未加载条带的超表面阵列进行了比较。加载条带之后,表面阵列的工作频率可以从 5.3 GHz 降低到 3.7 GHz,即超表面阵列的尺寸可以从 $0.71\lambda_0 \times 0.71\lambda_0 \times 0.056\lambda_0$ 减小为 $0.51\lambda_0 \times 0.51\lambda_0 \times 0.04\lambda_0$ 。

综上所述,天线的工作频率可以通过改变条带插入深度 L_1 进行调节,长度越长,工作频率越低,天线电尺寸越小。

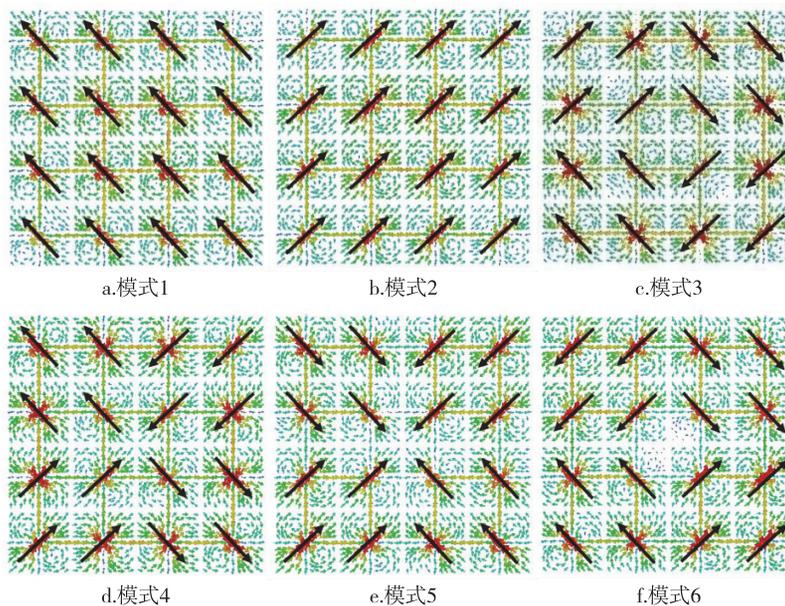


图 5 超表面阵列模式 1—模式 6 在 3.6 GHz 处的表面电流分布
Fig. 5 The current distribution on MS of Mode1 to Mode6 at 3.6 GHz

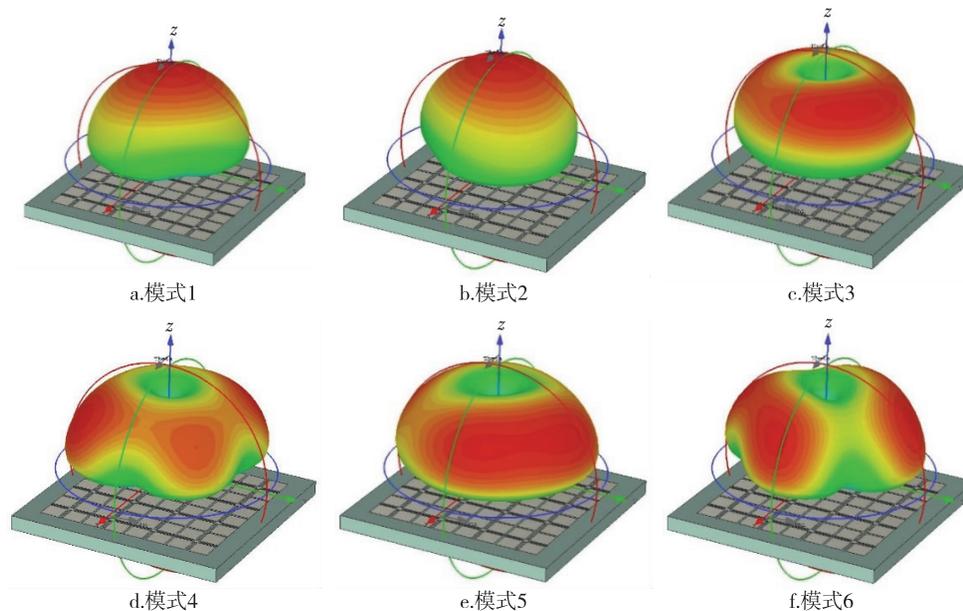


图6 超表面阵列模式1—模式6在3.6 GHz处的辐射方向图

Fig. 6 The radiation pattern of Model1 to Mode6 at 3.6 GHz

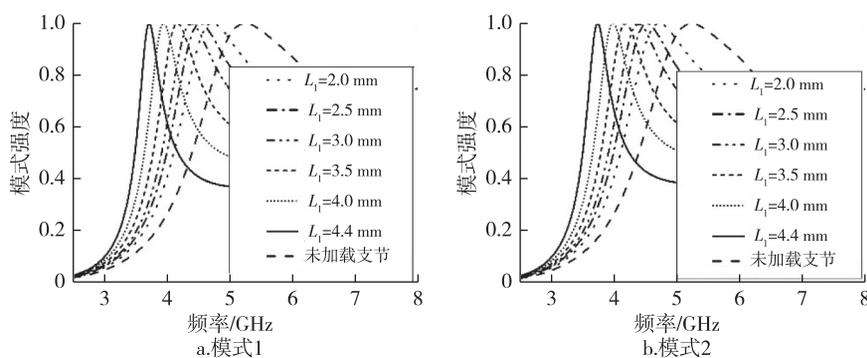

 图7 条带插入深度 L_1 对模式1和模式2模式强度的影响

 Fig. 7 The variation of modal significance of Mode1 and Mode2 as the depth of insert strip L_1 increase

3 小型化超表面天线设计

由分析可知,只有在超表面阵列上激励起模式1或者模式2时,才能实现定向辐射的特性.如图8所示,本文提出了一个由2层介质基板组成的超表面天线,2层基板为罗杰斯4003C(节点常数为3.55),厚度分别为 h_1 和 h_2 .上基板表面为 4×4 小型化超表面阵列用作天线的辐射单元,而金属地板放置在上下介质层之间.为了激励起这2个模式中的一个,通过在金属地的中心沿 y 轴方向蚀刻一条长度为 L_s 和宽度为 W_s 的缝隙给上层超表面进行馈电,并且在下基板的底部印刷具有终端开路结构的 50Ω 微带线作为馈电线.根据以上分析和仿真优化,天线其他尺寸的取值如表1中所示.

表1 条带加载型小型化超表面天线的参数尺寸

Table 1 Design parameters of the proposed antenna

参数	描述	大小
W /mm	介质基板的宽度	48
h_1 /mm	上介质基板的厚度	3.25
h_2 /mm	下介质基板的厚度	0.508
W_0 /mm	超表面单元正方形贴片的宽度	10
g /mm	超表面单元之间的间距	0.5
W_1 /mm	插入条带1,2的宽度	0.3
L_1 /mm	插入条带1,2的插入深度	4.4
s /mm	插入条带与金属贴片之间的缝隙宽度	0.35
W_s /mm	馈电缝隙的宽度	2
L_s /mm	馈电缝隙的长度	28
W_m /mm	微带线的宽度	2
r /mm	微带线终端扇形半径	6
$2\theta/(\circ)$	微带线终端扇形张开角度	120

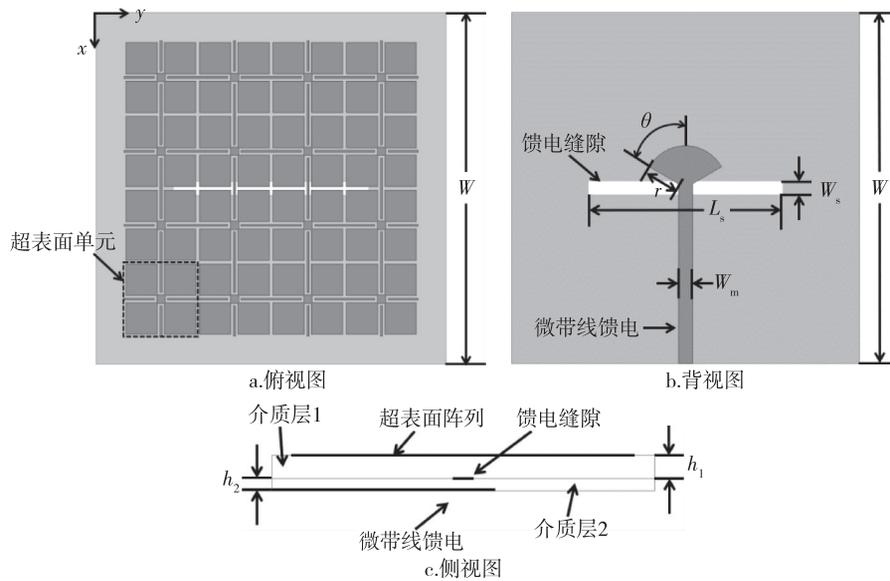


图 8 条带加载型小型化超表面天线的结构示意图

Fig. 8 Geometry of proposed miniaturized metasurface antenna:(a) top view;(b) back view;(c) side view

根据表 1 给出的设计参数,使用 HFSS 软件仿真即可得到所提出的天线的反射系数和增益特性。如图 9 所示,天线的 -10 dB 带宽为 17.4% ($3.21 \sim 3.82$ GHz),完全覆盖了针对 5G 通信的 3.5 GHz 频带,并

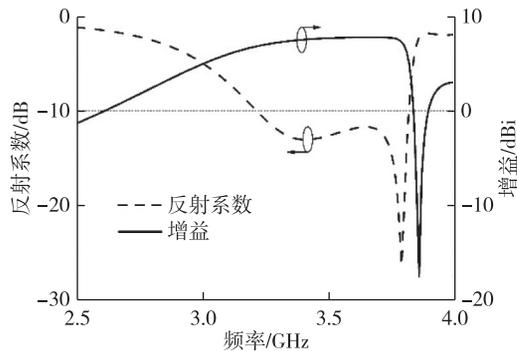


图 9 条带加载型小型化超表面天线的反射系数和增益特性

Fig. 9 The $|S_{11}|$ and gain of proposed compact metasurface antenna

且在此带宽内天线的增益为 $6.15 \sim 7.69$ dBi。此外,该天线的阵面尺寸仅有 $0.49\lambda_0 \times 0.49\lambda_0 \times 0.044\lambda_0$ (3.5 GHz 处),是没有引入条带加载的正方形超表面阵列^[4]的 45% (5.5 GHz 处尺寸为 $0.73\lambda_0 \times 0.73\lambda_0 \times 0.06\lambda_0$),因此天线尺寸显著减小。

4 仿真结果与性能比较

为了验证所提出天线的可行性与性能,对图 8 中的条带加载型小型化超表面天线进行加工,实物图如图 10a 所示,用 50Ω 的 SMA 射频转接头作为同轴馈电端。该天线的反射系数 $|S_{11}|$ 是用罗德施瓦茨 (ROHDE&SCHWARZ) 公司的矢量网络分析仪 (VNA) 测量的,而天线的增益和方向图等辐射特性的测试工作是在香港城市大学的 Satimo 近场暗室里完成的,如图 10b 所示。



图 10 条带加载型小型化超表面天线的加工测试图

Fig. 10 The photographs of (a) fabricated metasurface antenna and (b) SATIMO near-field measurement system

- gation,2015,63(7):3325-332
- [5] Liu W E I,Chen Z N,Qing X M,et al.Miniaurized wide-band metasurface antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2017,65(12):7345-7349
- [6] Liu Y,Luk K M,Yin H C.Bowtie patch antenna with electric dipole on a HIS substrate [C] // International Conference on Microwave & Millimeter Wave Technology.IEEE,2010:278-280
- [7] Yue T W,Jiang Z H,Werner D H.Compact, wideband antennas enabled by interdigitated capacitor-loaded metasurfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2016,64(5):1595-1606
- [8] Chen Y K,Wang C F.Characteristic-mode-based improvement of circularly polarized *U*-slot and *E*-shaped patch antennas [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2012,11:1474-1477
- [9] Lin F H,Chen Z N.A method of suppressing higher order modes for improving radiation performance of metasurface multiport antennas using characteristic mode analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2018,66(4):1894-1902
- [10] Lin F H,Chen Z N.Low-profile wideband metasurface antennas using characteristic mode analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2017,65(4):1706-1713

Miniaturized low-profile metasurface antenna using capacitive loading

JUAN Yue¹ CHE Wenquan^{1,2} YANG Wanchen^{1,2}

1 School of Electronic and Optical Engineering,Nanjing University of Science and Technology,Nanjing 210094

2 School of Electronic and Information Engineering,South China University of Technology,Guangzhou 510006

Abstract A miniaturized metasurface antenna using capacitive loading is investigated.First,anovel miniaturized metasurface unit cell is proposed.By introducing a pair of capacitive-loading strips inserted along the diagonal of a square patch,a size reduction of 55% can be achieved for this miniaturized unit cell.Furthermore,a compact metasurface antenna of a 4×4 array is designed using the miniaturized unit cells,which is fed by a slot structure.The radiation mechanism of the metasurface antenna is revealed and explained using a characteristic mode analysis (CMA).To validate the design,a prototype of the proposed antenna is fabricated and measurements are taken.The measured -10 dB impedance bandwidth is 21.7%,while a gain of 6 dBi is observed within the operating bandwidth.

Key words metasurface;miniaturized antenna;capacitive loading;characteristic mode analysis